

# 次世代大気モニタリングネットワーク用多波長高スペクトル分解ライダーの開発(2)

## Development of a multi-wavelength high spectral resolution lidar for the next-generation atmospheric monitoring network (2)

○西澤智明、杉本伸夫、松井一郎

T. Nishizawa, N. Sugimoto, and I. Matsui

国立環境研究所

National Institute for Environmental Studies

### Abstract

We are developing a multi-wavelength High-Spectral-Resolution Lidar (HSRL) system. This lidar provides  $2\alpha + 3\beta + 2\delta$  data: extinction coefficients ( $\alpha$ ) at 355 and 532 nm, backscatter coefficients ( $\beta$ ) at 355, 532, and 1064 nm, and depolarization ratios ( $\delta$ ) at 532 and 1064 nm. This system combines use of the previously developed HSRL techniques with an iodine absorption filter for 532nm and a Fabry-Perot etalon for 355nm. The 532nm HSRL and 1064nm receiver systems of this lidar were developed. Further a system to tune the laser wavelength to an iodine absorption line in this system was developed. We conducted preliminary measurements using the constructed systems. The temporal and vertical variation of aerosols could be determined. The constructed 532nm HSRL system could measure molecule Rayleigh backscatter signals by blocking aerosol Mie backscatter signals with the iodine absorption filter, indicating that the developed laser wavelength tuning system worked well.

### 1. はじめに

国立環境研究所 (NIES) では2波長偏光ミー散乱ライダーによるライダーネットワーク(NIESライダーネットワーク)を東アジア広域に展開し、エアロゾルや雲の動態把握を行ってきた[Sugimoto et al., 2005]。また、黄砂、大気汚染粒子、海塩といったエアロゾルの種類を判別しそれらの光学特性を抽出するデータ解析手法の開発も進めてきた[Sugimoto et al., 2003; Shimizu et al., 2004, Nishizawa et al., 2008a, 2010]。より多種のエアロゾル(例えば、すす粒子)を分離評価し、より詳細な微物理特性(サイズなど)を評価するには、より多くの測定チャンネル(測定波長数の増加や消散係数の分離測定など)を持ったライダー観測が必要となる。そこで NIES では、黄砂や大気汚染粒子の特性をより詳細に評価できる次世代のライダーネットワークの構築を主眼として、多波長高スペクトル分解ライダー(HSRL)の開発を進めてきた[Nishizawa et al., 2008b]。この多波長 HSRL の開発では、福井大学で開発されたファブリ・ペロ・エタロン干渉計(以下、エタロン)による波長 355nm での HSRL 技術 [Imaki et al., 2005]、そして NIES で開発されたヨウ素吸収フィルターによる波長 532nm での HSRL 技術[Liu et al., 1999]を統合して2波長 HSRL システムを構築する。Nd:YAG レーザーの3波長(355,532,1064nm)を有効活用し、波長 532nm および 1064nm での偏光測定も実施する。結果として2波長での消散係数(355,532nm)、3波長での後方散乱係数(355,532,1064)そして2波長での偏光解消度(532,1064nm)の7チャンネルの測定要素を持つライダーを開発する。自動連続測定を実現するために、狭帯域フィルターとレーザーの波長を自動同調させる技術開発も実施する。

前回のレーザーセンシングシンポジウム(LSS27)において、この多波長 HSRL の開発計画とその測定値を用いたエアロゾル分類推定アルゴリズムについて発表した[Nishizawa et al., 2009]。本発表では、開発の終了した波長 532nm の HSRL システムについて主に述べる。また、現在開発を進めている波長 355nm の HSRL システムについても、その進捗状況について報告する。

### 2. 多波長 HSRL システム

開発した多波長 HSRL システムの構成を図1に、諸元を表1に記載する。ライダーは、小型化を図り2層構造とした(図1)。レーザー送信部、望遠鏡、1064nmと532nmの受信部は第1層に構築し、355nmの受信部は第2層に構築し

た。レーザーは、市販のインジェクションシーダーNd:YAG レーザー(Surelite I/Continuum)を用いた。望遠鏡は光学定盤に水平に設置し、送受信は同軸システムとした。望遠鏡で集光した散乱光はビームスプリッターで3波長(1064, 532, 355nm)に分け、355nm 受信光は光ファイバーによって第2層へ送る。1064nm 受信部では、APDによって全散乱光(Mie 成分+Rayleigh 成分)の偏光測定を行う(水平成分( $APD_{1064,||}$ )と垂直成分( $APD_{1064,\perp}$ ))。532nm 受信部ではPMTによって、全散乱光の偏光測定( $PMT_{532,||}$ 、 $PMT_{532,\perp}$ )、及びヨウ素吸収フィルターを用いた Rayleigh 成分の測定を行う( $PMT_{532,Ray}$ )。ヨウ素吸収フィルターは 40cm 長のガラスセルにヨウ素を封入して作成した。355nm 受信部では、全散乱光の測定 ( $PMT_{355}$ )とエタロンを用いた Mie 成分の測定( $PMT_{355,Mie,ch1}$ 、 $PMT_{355,Mie,ch2}$ )を行う。また、355nmHSRL の検証用として、波長 387nm でのラマン散乱光(窒素ラマン)の測定をフотонカウンティングで行う(第一層の  $PMT_{387,Raman}$ )。

自動連続測定の実現のために、本研究ではレーザー波長、ヨウ素吸収フィルターの吸収波長、そしてエタロンの透過波長を自動調整する技術の開発も行う。本ライダーでは小型化やコスト低減の観点から1台のレーザーしか用いない。そこで、ヨウ素吸収フィルターの吸収波長にレーザー波長を固定し(レーザー波長固定手法)、そして固定したレーザー波長にエタロンの透過波長を調整する(エタロン波長調整手法)ことにした。先行研究で音響光学変調器(AOM)とヨウ素吸収フィルターを用いたレーザー波長固定手法が開発された[Liu et al., 1999]。この手法では、レーザー送信光の一部を AOM へ引き入れその0次光と1次光をヨウ素吸収フィルターへ通し、測定した0次光と1次光の信号強度の変化を利用してレーザー波長を調整する。本研究では、この手法を改良し、2つの AOM によって±1次光を作成しその信号強度を測定することで波長調整の効率化を図った(図1)。エタロン波長調整手法では、エタロンを透過した散乱光を焦点距離の長いレンズ(焦点距離1m)で集光して干渉縞を作り、その強度を2つの PMT ( $PMT_{355,Mie,ch1}$  と  $PMT_{355,Mie,ch2}$ )で測定する。焦点面に、中心に穴を開けたミラーを設置することで、干渉縞の中心部の強度( $PMT_{355,Mie,ch1}$ )と周辺部の強度( $PMT_{355,Mie,ch2}$ )を分けて測定する。干渉縞の中心部と周辺部の強度を、エタロン内の圧力を変えて調整することで、エタロン透過波長をレーザー波長に調整することができる[Sugimoto et al., 2008]。

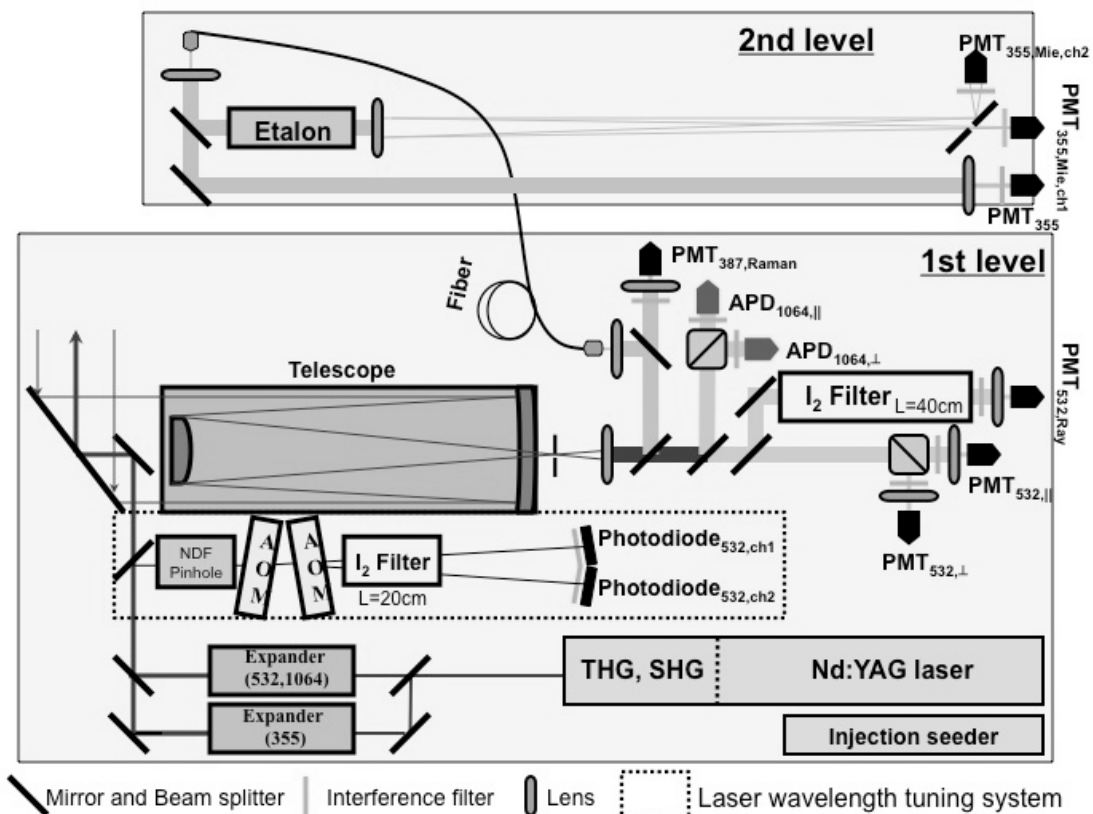


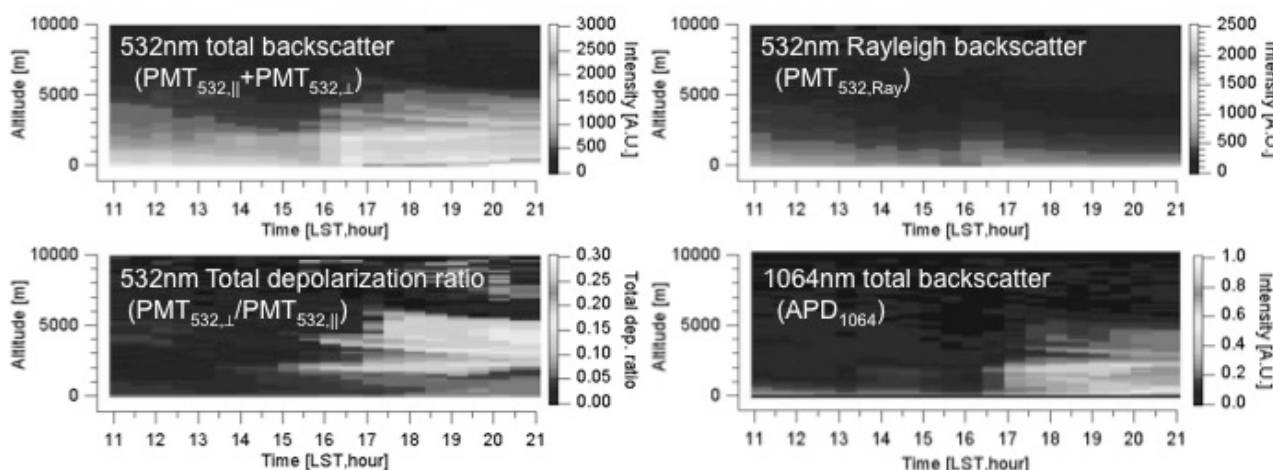
Fig. 1. Lidar system configuration.

**Table 1.** Lidar system specifications.

<b>Transmitter</b>	
Laser type	Nd:YAG, Q-switched, injection-seeded, linearly polarized
Wavelength	1064, 532, 355nm
Line width	0.005cm <sup>-1</sup>
Pulse energy	100mJ for each wavelengths
Repetition rate	10Hz
Divergence	0.1mrad (using a 5x expander)
<b>Receiver</b>	
Telescope	Cassegrain, D=21cm
FOV	0.5mrad
Detectors	Licel APD for 1064nm; Licel PMT for 532, 355nm; Licel PMT for 387nm (N <sub>2</sub> Raman channel)
<b>Detections and wavelength separators</b>	
Interference filter	1nm (FWHM) for each wavelength
Rayleigh, 532nm	40cm iodine cell
Mie, 355nm	Fabry-Perot etalon (Finesse =10, FSR=5GHz)
<b>Data acquisition</b>	
	•A/D converter for 532, 1064nm (25MHz, 12bit) •Licel transient recorder for 355, 387nm (40MHz, 12bit)

### 3. 波長 532nmHSRL と波長 1064nm 受信部を用いた測定

構築した 532nm と 1064nm 受信部の動作確認として、予備測定を行った。信号は高度 6m 毎、時間 10s 毎 (100shots) に測定した。測定したデータを高度 180m 毎、時間 30 分毎で積算した (図2)。測定を開始する前に、構築した AOM を用いたレーザー波長固定システムを用いてレーザー波長をヨウ素吸収フィルターの吸収波長に調整した。



**Fig. 2.** Time-height cross sections of range-corrected signals for the 532nm total backscatter (upper left), 532nm Rayleigh backscatter (upper right), and 1064nm total backscatter (lower right), and 532nm total depolarization ratio (lower left) from 1100 to 2100 LT on March 11, 2010, in Tsukuba (140.12E, 36.05N), Japan.

測定日は、比較的晴れていた。16時(LT)を過ぎた頃から偏光解消度が高くなり(図2b)、波長 532nm や 1064nm の

全後方散乱強度も高くなっている(図2a,c)。NIESの2波長偏光ライダーの測定でも同じ傾向を示しており、黄砂が飛来したと考えられる。一方、ヨウ素吸収フィルターを通して測定した信号強度(PMT<sub>532, Ray</sub>, 図2d)は、全後方散乱信号の様な増加は見られず、比較的一様である(むしろ、幾分信号は減少しており、これは黄砂による信号の減衰と考えられる)。このことは、ヨウ素吸収フィルターによって適切に Mie 散乱成分をブロックできていたことを示している。また、レーザー波長固定システムを用いたレーザー波長調整が上手く機能していたことを示している。測定中、レーザー波長の変化をモニターした(Photodiode<sub>532, ch1</sub> と Photodiode<sub>532, ch2</sub> (図1))。レーザー波長の変化は±0.3pm 程度と推定され、本研究で使用したヨウ素吸収線のスペクトル幅(2pmFWHM)に比べ小さく、比較的安定していたと考えられる。

#### 4. 今後の予定

波長 532nmHSRL と波長 1064nm 受信部を用いた上記予備測定では、レーザー波長の自動調整には至らなかった。現在、自動調整プログラムの根幹部の作成は終了し調整を行っており、長時間にわたる連続測定を今後実施する。

波長 355nmHSRL については、装置の構築が終了し、現在エタロン透過波長調整手法のための基礎データ(圧力変化に対するエタロン透過率データ等の取得)の取得と自動調整プログラムの作成を行っている。基礎データの取得が終了し次第、短時間での予備測定を行う。また、自動調整プログラム作成後に、長時間の連続測定を実施する。

#### 謝辞

本研究は環境省環境研究総合推進費(旧環境研究・技術開発推進費)(課題番号:B-0803)の助成のもと実施されている。

#### 参考文献

- Imaki et al. 2005, *Jpn. J. App. Phys.*, **44**, 3063–3067.
- Liu et al., 1999, *Optical Engineering*, **38**, 1661–1670.
- Shimizu et al., 2004, *J. Geophys. Res.*, 109, doi:10.1029/2002JD003253
- Sugimoto et al., 2003, *Geophys. Res. Lett.* **30**, 1640, doi:10.1029/2002GL016349.
- Sugimoto et al., 2005, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, **5**, 145–157.
- Sugimoto et al., 2008, *Proc. 24th ILRC*, 192–195.
- Nishizawa et al., 2007, *J. Geophys. Res.*, **112**, D06212, doi:10.1029/2006JD007435.
- Nishizawa et al., 2008a, *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.*, 46, 4094–4103.
- Nishizawa et al., 2008b, *Proc. 24th ILRC*, 361–364.
- Nishizawa et al., 2009, *27<sup>th</sup> Japanese Laser sensing symposium abstracts of papers*, 30–31.
- Nishizawa et al. 2010, *J. Quant. Spectro. Radiat. Trans.*, doi: 10.1016/j.jqsrt.2010.06.002, in press.